

「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」
平成 20 年度採択研究代表者

小林 亮

広島大学大学院理学研究科・教授

生物ロコモーションに学ぶ大自由度システム制御の新展開

1. 研究実施の概要

本研究の最終的なねらいは、生物に学ぶことにより、生物並みにしなやかにロバストに、複雑で不確定な現実の環境の中を動き回れるロボットを作ることである。そのために生物学者・数学者・工学者からなるチームを編成した。目標達成のためにはロボットに大自由度を与え、かつそれをうまく制御しなければならない。これを達成するためには、CPG (Central Pattern Generator) を核とした自律分散制御と自己組織化によるロコモーション生成が必要であるが、現状では自律分散制御には自律個と全体を結ぶ「設計原理」が欠落している。我々は、粘菌やアメーバのような単細胞生物に立ち返って、この設計原理を抽出することを試みる。実際、単細胞生物のロコモーションには、中枢が無い故に自律分散制御がもっとも端的な形で現れているからである。これらの生物を起点に、より複雑な多細胞生物のロコモーションにアタックしていくのが、我々のプロジェクトの道筋である。

小林と中垣は、本プロジェクト開始以前から真正粘菌変形体の運動と情報処理について共同研究を行い、いくつかの数理モデルを提案してきた。その段階では自律分散制御という観点は希薄であったが、実際のところ、この生物は全身が CPG の集合体というべきもので、数理モデルには期せずして(必然ではあるが) CPG へのフィードバックが含まれていた。このことは、石黒によって再発見され、自律分散制御の観点から見直しが行われた。その結果、我々は **Discrepancy function** (齟齬関数) によるフィードバックという概念に到達した。本年度は、理論面ではいくつかの事例を通して、この概念の有効性や適用限界などについて検討を行った。また、アメーバの運動解析のシステムを構築し、アメーバ運動の数理モデルを提案した。実機面では、アメーバ様ロボットを作成し、**Discrepancy** を用いた制御を試みた。

「**Discrepancy** を積極的に作り出し、それを手なずける」というのが、現段階での我々の基本的なアイデアである。次年度には、現在進行中のアメーバロボットの改良に加えて、この **RTS** を用いていくつかの動物(線虫、ミミズ、ヘビなど)のモデリングと実機製作を行う。この作業を通して、**Discrepancy** フィードバックの性質と可能性を探ろうと考えている。また、形状記憶合金やソフトマターなどの機能性素材を活用して、自由度数を大幅に増やすことを考えている。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

今年度の大きな成果は、Discrepancy function (齟齬関数) とそれを介したフィードバックという概念が、明確になったことである。これは元来、小林・中垣が真正粘菌変形体の運動に関するモデルにおいて導入した「自然長が振動子によって駆動されるバネ」に対するフィードバック法に端を発している。石黒はこれとは独立に「自然長をリアルタイムで制御できるバネ」= RTS (Realtime Tunable Spring) を開発した。この RTS は、自然長の変化を通じた能動的素子としての側面と、通常の弾性バネの受動的素子としての側面を併せ持っており、筋肉やアクチン-ミオシン系を mimic するのにちょうど良いものである。この RTS は CPG が望む状態(バネの自然長)を内部状態として実現し、実際のバネ長との差による張力(または弾性エネルギー)を Discrepancy として持つような力学的素子と見なすことができる。この Discrepancy をモニターするために RTS と圧力センサーを組み合わせたものをアクチュエータとして用いることにより、Discrepancy function を用いた自律分散制御を行うロボット、およびその数理モデルを同時に構築することができるようになった。

小林グループでは、上述の Discrepancy function によるフィードバックの基本的性質を調べるために、RTS を2つ組み合わせた単純な系に対する理論的解析を行った。その結果、機械系(からだ)の好む周波数が CPG の元来の周波数より大きくないときには、CPG の周波数が適応的に変化し、機械系をうまく駆動できることが明らかになった。また、アメーバ運動を記述するために、フェーズフィールドモデルと SPH(Smooth Particle Hydrodynamics)を組み合わせた数理モデルを提案した。アメーバ運動の本質は、原形質ゾルの前方へ流動とゾル-ゲル変換を介した3次元キャタピラー運動であるが、我々のモデルはこれらの過程を細胞膜の変形と共に記述することを可能とした(図1)。しかし、このモデルだけでは外部からコントロールされた受動的運動しか記述できないので、このモデルをある種の反応拡散方程式系をカップルすることにより、自律的に行動するアメーバのプロトタイプモデルを作成した。

中垣グループでは、真正粘菌変形体とアメーバプロテウスにおける、生物のロコモーションの解析技術の確立を行った。顕微鏡イメージング技術とビデオ画像処理法を駆使して、体形変化、重心移動、アクチン繊維の形成、原形質輸送の時間空間的な定量を可能にした(図2)。これら四つの物理量の相互関係の解析に着手した。これは、粘弾性体の運動様式解明をめざすもので

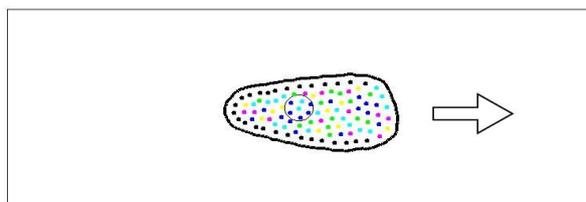


図1 アメーバ運動のシミュレーション

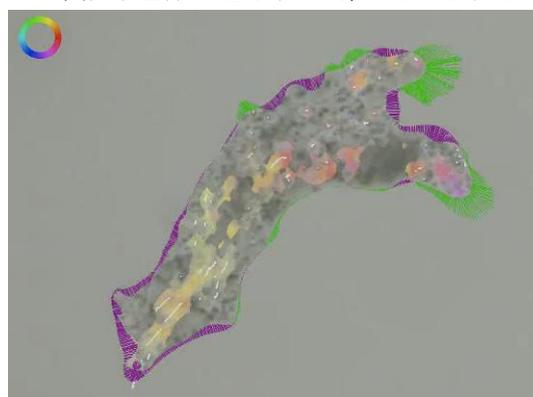


図2 アメーバ運動の画像解析

ある。予備的な段階ではあるが、1) 体全体を締め上げるようなアクチオン繊維の形成、2) 細胞の曲率と柔らかさの関係などが興味深い事実として浮かび上がって来た。実験系の基本的セットアップを完了し、次年度からの本格的解析に結びつけた。また、ヘビなどの這う生き物への将来的な発展を見越して、線虫の運動観察セットアップも作製した。小林グループの数理モデリング、石黒グループの実機制作において、生物実験サイドとして当初の段階から固有のアイデアを提供してきた[2]。

石黒グループでは、小林と中垣らによって提案された真正粘菌変形体の運動に関する数理モデルに基づくアメーバ様ロボット実機のプロトタイプモデルの設計・製作を行った[1]。このロボットは、接地摩擦を制御可能な機械

ユニットを RTS で閉ループ状につなげた外皮 (真正粘菌変形体のゲル状の外皮に相当) の内部に、原形質に相当するゴム風船を封入した構造を有している。接地摩擦の制御と RTS の伸縮は、位相振動子によって自律分散的に制御されている。原形質量が保存されているため、機械ユニット間には適切な遠距離相互作用が生じていることに注意されたい。このロボットに、discrepancy function に基づく局所フィードバック制御則を導入したところ、図3(a)に示すように、プリミティブながらもアメーバ様ロコモーションを発現することができた。同図(b)は、実験途中で原形質に相当するゴム風船に穴をあけ、機械ユニット間の長距離相互作用を取り除いた実験結果である。原型質量保存則の改悪に伴い、自律分散制御に破綻をきたしている様子が見て取れる。この予備実験の結果から、真正粘菌は柔らかな身体が持つ力学的特性を活かして、完全自律分散的な制御にも関わらず、個と全体をうまくつないでいると予想される。

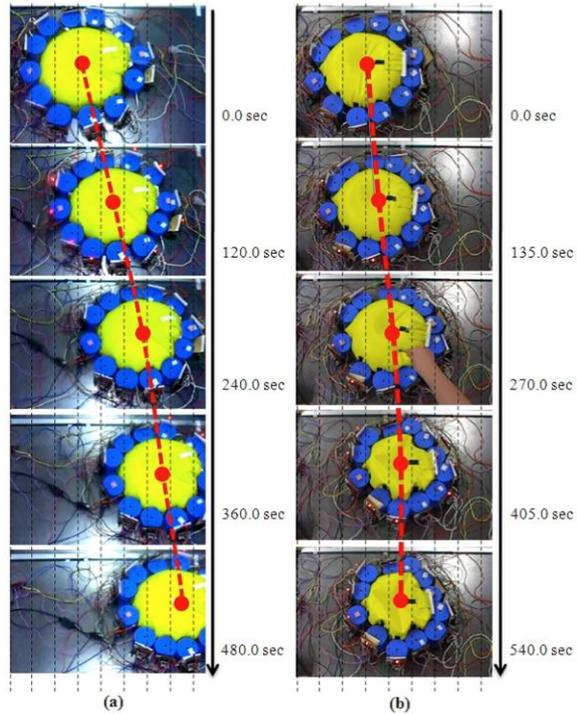


図3 アメーバ様ロボットの動作実験

3. 研究実施体制

(1) 小林グループ

- ① 研究分担グループ長: 小林 亮 (広島大学・大学院、教授)
- ② 研究項目:
 - ・ 真正粘菌変形体の運動のモデリング
 - ・ アメーバ運動のモデリング
 - ・ Discrepancy function に基づくフィードバックの解析

(2) 中垣グループ

①研究分担グループ長:中垣 俊之(北海道大学、准教授)

②研究項目

- ・ 粘菌とアメーバプロテウスの運動観察セットアップの確立
- ・ 体形変化、原形質流動、アクチンミオシン繊維形成、重心移動の関係解析プログラムの作成
- ・ 線虫の這行運動観察セットアップの作成
- ・ アメーバ運動における齟齬関数の考察と数理モデルへの応用

(3)石黒グループ

①研究分担グループ長:石黒 章夫(東北大学・大学院、教授)

②研究項目

- ・ アクチンミオシンの伸縮を工学的に模擬した可変弾性要素の開発
- ・ **Discrepancy function** に基づく自律分散制御則のアメーバ運動生成への適用とシミュレーションによる検証実験
- ・ 可変弾性要素を用いたアメーバ様ロボットのプロトタイプモデルの設計・製作
- ・ ヘビ型ロボットプロトタイプモデルの設計・製作
身体の力学的特性変化に適応可能なオシレータモデルの提案

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. T. Umedachi, T. Kitamura, T. Nakagaki, R. Kobayashi and A. Ishiguro : “A modular robot driven by protoplasmic streaming”, Proceedings of DARS2008 (2008.11)
2. A.Tero, T. Nakagaki, T. Kazutaka, Y. Kenji and R. Kobayashi : “A method inspired by Physarum for solving the Steiner problem”, *International Journal of Unconventional Computing*, in press (2009)

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)

受賞

中垣俊之, 小林亮, 石黒章夫:イグノーベル賞認知科学賞 (2008.10.2)